

UDK 551.242:528.024:531.1(497.57)

Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

Ispitivanje kvalitete kinematičkog modela recentnih relativnih visinskih gibanja Zemljine kore na teritoriju poluotoka Istre

Marko RADANOVIĆ, Nevio ROŽIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. Kvaliteta kinematičkog modela recentnih relativnih visinskih gibanja Zemljine kore, čije je područje obuhvata teritorij Hrvatske, Slovenije i Bosne i Hercegovine te koji je referiran na vremenski interval 1874.–1973. godine, detaljnije je ispitana i analizirana na teritoriju poluotoka Istre. Primijenjena je indirektna metoda ispitivanja kvalitete kinematičkog modela, koja se temelji na usporedbi kriterija točnosti izvornih nivelmanskih mjerenja geometrijskog nivelmana (precizni nivelman i I. nivelman visoke točnosti) i tih mjerenja korigiranih, odnosno reduciranih, za sustavni utjecaj visinskih gibanja Zemljine kore. Na dijelu I. nivelmanskog poligona II. nivelmana visoke točnosti, koji obuhvaća teritorij poluotoka Istre, visinske razlike nivelmanskih vlakova su primjenom kinematičkog modela reducirane iz izvornih epoha izmjere u srednju epohu izmjere II. nivelmana visoke točnosti. Za izvorna i reducirana mjerenja obavljeno je određivanje pokazatelja točnosti „a priori“ i „a posteriori“ te je obavljena njihova usporedba i analiza. Utvrđeno je umjereno povišenje točnosti mjerenja nakon primjene redukcija, a u odnosu na točnost izvornih mjerenja. Navedeno indirektno upućuje na činjenicu da je kinematički model pridonio uklanjanju sustavnih utjecaja visinskih gibanja Zemljine kore koji su sadržani u mjerenjima visinskih razlika.

Ključne riječi: kinematički model, visinska gibanja kore, sustavne pogreške, nivelmanske mreže, visinski pomaci, Istra.

1. Uvod

Kinematički model recentnih relativnih visinskih gibanja Zemljine kore koji se primarno odnosi na teritorij Hrvatske te posljedično i na teritorij Slovenije i Bosne i Hercegovine predložen je i opisan u Rožić (2015). Kao osnova za kreaciju modela poslužili su modeli relativnih visinskih pomaka Zemljine kore izloženi u Rožić i Razumović (2010), Rožić i dr. (2011). Modeli pomaka kreirani su na temelju

¹ Marko Radanović, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: maradanovic@geof.hr,

prof. dr. sc. Nevio Rožić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: nrozic@geof.hr.

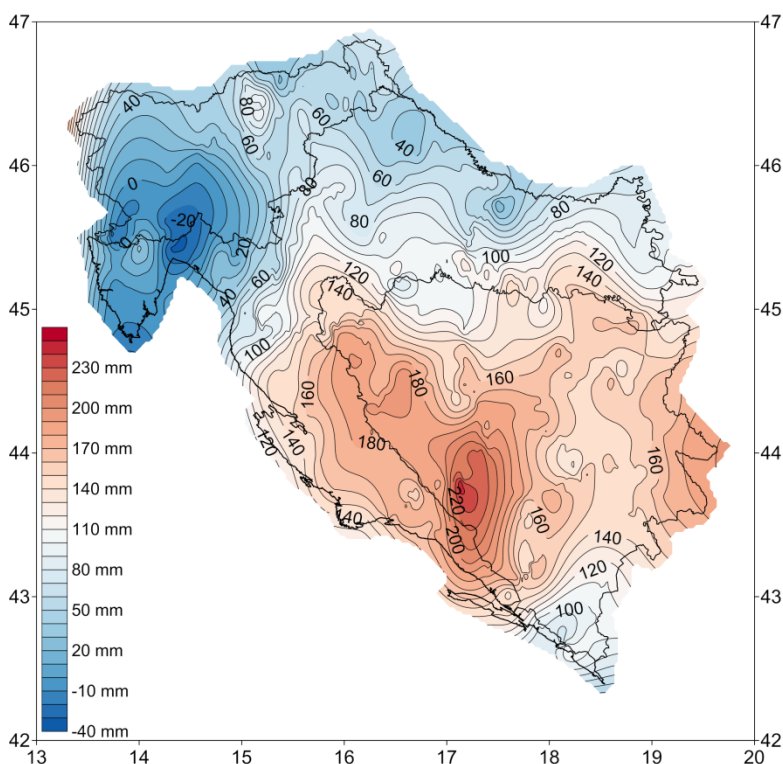
podataka izmjere i računske obrade nivelmanskih mreža geometrijskih nivelmana najvišeg reda točnosti, tj. tzv. mreža I. reda realiziranih u vremenskom razdoblju od 1874. do 1973. godine na teritoriju Austro-Ugarske Monarhije i bivše Jugoslavije. U tom razdoblju sastavnica navedenih država bila je i današnja Hrvatska. To su mreže: Austrijskog preciznog nivelmana (skraćeno APN, srednja epoha izmjere 1892,8 godina), I. nivelmana visoke točnosti (INVT, srednja epoha izmjere 1949,0 godina) i II. nivelmana visoke točnosti (IINVT, srednja epoha izmjere 1971,1 godina).

Kinematički model relativnih visinskih gibanja Zemljine kore, u obliku jednoliko ubrzanog ili usporenoga gibanja diskretnih točaka Zemljine kore, realiziran je funkcijama:

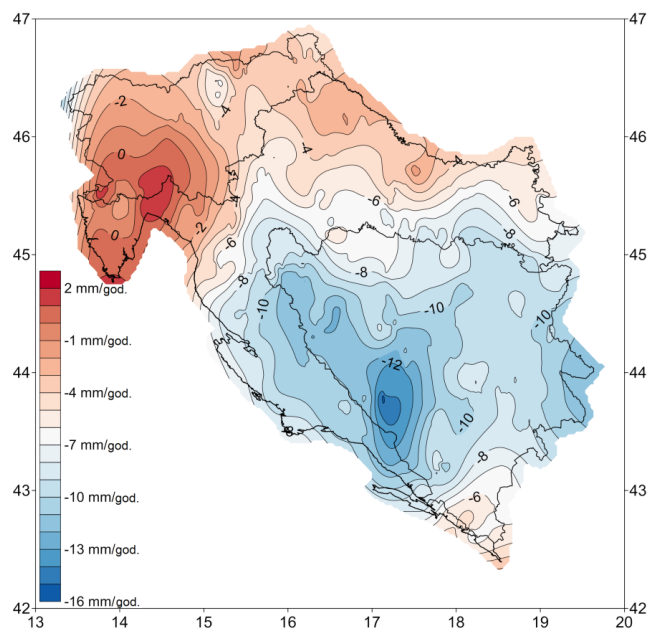
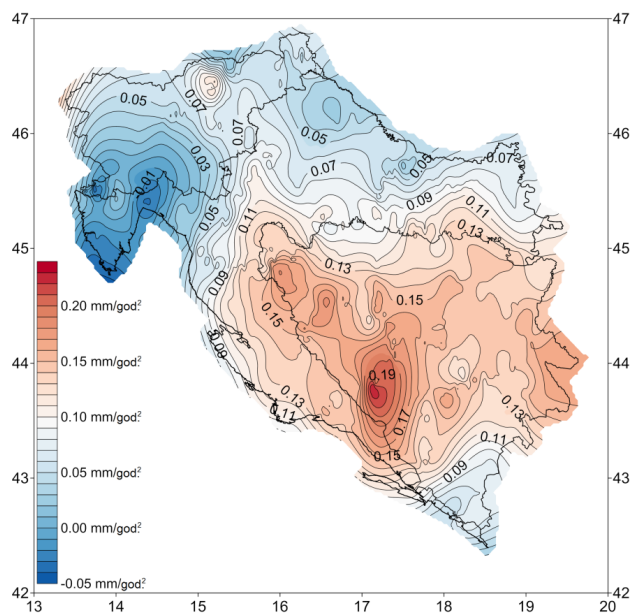
$$\Delta H_i = \Delta H_0 + v_0(t_i - 1874,0) + \frac{1}{2}a(t_i - 1874,0)^2, \quad (1)$$

$$v_i = v_0 + a(t_i - 1874,0) \quad (2)$$

i grid modelima kinematičkih parametara visinskoga gibanja. To su: grid model visinskih položaja točaka ΔH_0 Zemljine kore u inicijalnoj epohi kinematičkog modela t_0 ($t_0 = 1874,0$ je godina početka izmjere mreže APN), grid model brzina gibanja točaka v_0 u inicijalnoj epohi t_0 i grid model konstantnih akceleracija a točaka Zemljine kore, slika 1, slika 2 i slika 3.



Slika 1. Grid model – parametar ΔH_0 (Rožić 2017).

Slika 2. Grid model – parametar v_0 (Rožić 2017).Slika 3. Grid model – parametar a (Rožić 2017).

Kinematički parametri ΔH_0 , t_0 i a , sadržani u grid modelima, omogućuju određivanje relativnih visinskih pomaka diskretnih točaka Zemljine kore ΔH_i , u odnosu na inicijalnu epohu kinematičkog modela t_0 , za neku proizvoljno odabranu epohu t_i pomoću izraza (1), odnosno određivanje trenutanih brzina gibanja v_i točaka u epohi t_i primjenom izraza (2). Kinematički parametri ΔH_0 , t_0 i a pridruženi su čvorovima gridova tako da s podacima elipsoidnih položaja čvorova tvore uređene triplete podataka $(\lambda, \varphi, \Delta H_0)$, (λ, φ, v_0) i (λ, φ, a) , gdje su λ i φ elipsoidne dužine i elipsoidne širine čvorova na Besselovu elipsoidu. Ishodište za elipsoidne dužine je meridijan u Greenwichu. Gridovi su identično georeferencirani, tako da podudarni čvorovi svih triju gridova imaju isti elipsoidni položaj. Kinematički parametri izvan čvorova grida, a unutar područja obuhvata modela, tj. teritorija Hrvatske, Slovenije i Bosne i Hercegovine, određuju se primjenom bilinearne interpolacije. Primjena bilinearne interpolacije pretpostavlja linearnu i kontinuiranu promjenu kinematičkih parametara u smjeru elipsoidne dužine i širine (Rožić i dr. 2011). Svaki grid za pojedini kinematički parametar definira odgovarajuću kontinuiranu prostornu plohu na području obuhvata modela.

Grid modeli kinematičkih parametara dostupni su za testiranje i uporabu (Rožić 2016). Važno je naglasiti da je primjena kinematičkog modela suvisla samo unutar vremenskog intervala definiranog početkom izmjere APN-a i završetkom izmjere IINVT-a, dakle od 1874. do 1973. godine. Iako se model matematički može primijeniti i izvan navedenog intervala, relativni visinski položaji, relativni visinski pomaci i brzine gibanja točaka mogu biti vrlo nepouzdati za uporabu.

2. Kvaliteta kinematičkog modela

Kvaliteta kinematičkog modela visinskih gibanja Zemljine kore ovisi o nizu različitih faktora. Prije svega ovisi o kvaliteti i pouzdanosti nivelmanskih podataka koji su poslužili za izradu modela relativnih visinskih pomaka, koja je sistematizirana i izložena u Rožić (2001). Nadalje, ovisi o metodama i postupcima primijenjenim pri kreaciji modela relativnih visinskih pomaka te posljedično o metodama primijenjenim pri kreaciji kinematičkog modela, što je pobliže objašnjeno u Rožić i dr. (2011), Rožić (2015). U nedostatku neovisnog referentnog skupa nivelmanskih podataka primjerene kvalitete, koji bi omogućili direktno vrednovanje kvalitete kinematičkog modela, opravdana je i razložna primjena metode indirektnog vrednovanja njegove kvalitete, opisana i već primijenjena u Rožić (2017).

Naime, u skladu s hijerarhijskom strukturom državnih nivelmanskih mreža različitih redova točnosti, nivelmanska mreža preciznog nivelmana (mreža II. reda) oslanja se, u sklopu realizacije odgovarajućeg visinskog referentnog sustava, na mrežu nivelmana visoke točnosti (mreža I. reda). Pri oslanjanju je evidentno da početne ili završne repere nivelmanskih vlakova mreže II. reda čine reperi (čvorni reperi) koji su prethodno već obuhvaćeni mrežom I. reda. Kako su nivelmanski vlakovi mreže II. reda u pravilu mjereni u epohama signifikantno različitim od epohe izmjere mreže I. reda, a u Hrvatskoj je razvidna upravo takva pojavnost, može se ustvrditi da su zbog visinskih gibanja Zemljine kore reperi u različitim epohama imali signifikantno različit visinski položaj. Visinski pomaci repera između različitih epoha, koji su po naravi stvari u epohama izmjere eksplicitno integrirani u izmjerene visinske razlike, mogu se kvalificirati i kvantificirati kao sustavni utjecaji visinskih gibanja Zemljine kore. Njihov efekt dolazi do izražaja

posebice pri integraciji mreža I. i II. reda. On se indirektno može ispitati određivanjem i analizom pokazatelja kvalitete mjerenja visinskih razlika nivelmanskih vlakova. Sukladno elementarnoj logici jasno je da bi se temeljem eliminiranja ili bolje reći reduciranja utjecaja visinskih pomaka repera iz izvornih mjerenja trebala iskazati povoljnija razina točnosti reduciranih mjerenja. Pritom kvaliteta reduciranja izvornih mjerenja neposredno ovisi o kvaliteti kinematičkog modela visinskih gibanja Zemljine kore, odnosno očekivano povišenje kvalitete reduciranih mjerenja indirektno bi trebalo uputiti na dostatnu kvalitetu kinematičkog modela za uporabu upravo u tu svrhu. Povišenje točnosti reduciranih mjerenja, u odnosu na izvorna mjerenja, trebalo bi uputiti na utemeljenost primjene kinematičkog modela u svrhu redukcije izvornih mjerenja, koja pripadaju različitim epohama izmjere, u jednu te istu tj. jedinstvenu epohu. Stručna logika upućuje na činjenicu da bi to svakako trebala biti epoha izmjere mreže I. reda. Jasno je da se navedeni koncept podjednako može primijeniti za sve redove točnosti nivelmanskih mreža geometrijskog nivelmana (II., III. i IV. red), koje se međusobno integriraju u kontekstu realizacije odgovarajućeg visinskog referentnog sustava.

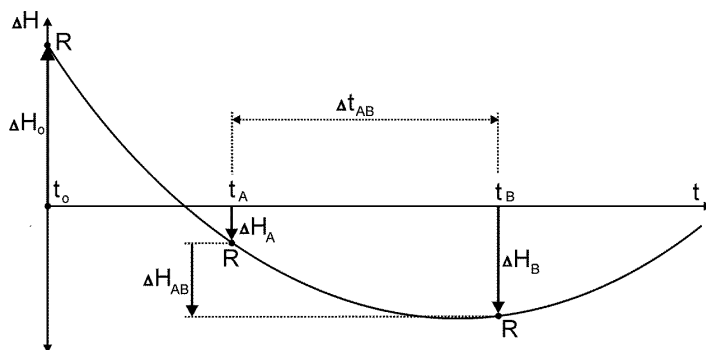
Primjenom navedenoga koncepta prethodno su već analizirani pokazatelji točnosti mjerenja nivelmanskih mreža II. reda koje su sadržane u III. i V. nivelmanskoj figuri mreže IINVT-a, slika 4, te su izračunati i međusobno uspoređeni pokazatelji točnosti izvornih i reduciranih mjerenja (Rožić 2017). Usporedba pokazatelja točnosti dovela je do zanimljivog i na prvi pogled kontradiktornog rezultata. U III. nivelmanskoj figuri je temeljem redukcije izvornih mjerenja nastupilo umjereno povišenje točnosti mjerenja, dok su u V. nivelmanskoj figuri reducirana mjerenja dovela do umjerenog sniženja točnosti. S teorijskoga gledišta, upozoreno je i na vrlo vjerojatan uzrok nastanka takve pojavnosti, koji se suštinski može povezati i objasniti sa zakonitošću skupnog ponašanja niza različitih sustavnih pogrešaka sadržanih u visinskim razlikama. Naime, različite vrste sustavnih pogrešaka koje opterećuju nivelmanska mjerenja mogu simultano i kumulativno djelovati dosljedno jednostrano, dovodeći do maksimiziranja rezultante sustavnih utjecaja, odnosno mogu se simultanim djelovanjem međusobno poništavati (kompenzirati) dovodeći do minimiziranja rezultante sustavnih utjecaja (Rožić 1995). U III. nivelmanskoj figuri razvidno je da redukcija sustavnog utjecaja visinskih gibanja repera iz mjerenja logično pridonosi povišenju točnosti mjerenja, dok u V. nivelmanskoj figuri, iako redukcija načelno pridonosi eliminaciji sustavnih utjecaja, istovremeno narušava razinu njihove međusobne kompenzacije te dovodi do smanjenja točnosti mjerenja. Stoga, prethodno spomenuti odnos pokazatelja točnosti mjerenja u III. i V. nivelmanskoj figuri u suštini ne mora nužno biti ocijenjen kao kontradiktoran, jer može biti vrlo logična i razvidna posljedica zakonitosti skupnog djelovanja različitih sustavnih pogrešaka koje su sadržane u mjerenjima visinskih razlika (Rožić 2017). Naime, sustavni utjecaji mogu kumulativno djelovati u punom rasponu, od potpunog međusobnog kompenziranja, preko umjerenoga kompenziranja pa do potpunog izostanka kompenziranja. S navedenoga gledišta indirektna metoda ispitivanja i vrednovanja kvalitete kinematičkog modela, utemeljena na komparaciji pokazatelja točnosti izvornih i reduciranih mjerenja, posjeduje određenu razinu nesigurnosti, odnosno moglo bi se ustvrditi neeksplicitnosti, iako je njena primjena u postojećim objektivnim okolnostima vrlo pragmatična i održiva. Pragmatična je zato jer nisu raspoloživi, niti brojem niti kvalitetom, referentni nivelmanski podatci kojima bi se kvaliteta kinematičkog modela mogla ispitati i analizirati direktno, te zato što bi upuštanje u dubinsku analizu simultanog djelovanja različitih sustavnih pogrešaka sadržanih u mjerenjima, a u svrhu

kompenzacije. Može se postaviti teorijski utemeljena hipoteza da je pojavnost nepovoljnog odnosa kvalitete izvornih i reduciranih mjerenja u V. nivelmanskoj figuri na određeni način „kolateralna šteta“ koja proizlazi iz narušavanja postojeće razine kompenzacije sustavnih utjecaja, nakon reduciranja sustavnih utjecaja visinskih gibanja repera. Pojava narušavanja razine kompenzacije u V. nivelmanskoj figuri realna je zbog reljefnih, morfoloških i klimatskih karakteristika planinskog područja i neposrednoga kontakta s priobaljem, zbog kojih je udio različitih sustavnih utjecaja sadržanih u podatcima mjerenja zasigurno velik, odnosno znatno veći nego u nizinskom i klimatski ujednačenijem području III. nivelmanske figure. S toga gledišta, a u svrhu pribavljanja novih empirijskih pokazatelja kvalitete kinematičkog modela visinskih gibanja, svakako je uputno ciljano analizirati podatke koji su vezani uz reljefno i klimatsko područje poluotoka Istre.

3. Primjena kinematičkog modela

Kinematički parametri ΔH_0 , v_0 i a , ovisni o položaju neke diskretne točke $R(\lambda, \varphi)$ na površini Zemljine kore, omogućuju određivanje relativnog visinskog pomaka te točke u proizvoljno odabranim epohama t_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), a u odnosu na inicijalnu epohu kinematičkog modela t_0 pomoću izraza (1), odnosno određivanje trenutačnih brzina visinskih gibanja te točke u epohama t_i pomoću izraza (2). Kinematički parametri ΔH_0 , v_0 i a određuju se uporabom grid modela, slika 1, slika 2, slika 3, identifikiranjem odgovarajućih ćelija grida i primjenom bilinearne interpolacije. Jednostavna uporaba grid modela kinematičkih parametara moguća je npr. pomoću namjenski izrađenog specijaliziranog softvera (Železnjak 2015) ili nekog komercijalnog softvera koji raspolaže funkcijama uporabe grid modela (npr. Golden Software Surfer).

Kako se čvorni reperi obuhvaćeni nivelmanskim mrežama mogu smatrati idealiziranim diskretnim materijalnim točkama Zemljine kore, pomoću izraza (1) moguće je ne samo određivanje relativnoga visinskog položaja repera R u nekoj epohi t_i u odnosu na inicijalnu epohu modela t_0 , već je moguće i određivanje relativnih visinskih pomaka tog repera između dviju ciljano odabranih i međusobno različitih epoha t_A i t_B . Parabola na slici 5 opisuje trajektoriju vertikalnoga gibanja repera R u ovisnosti o vremenu t . Sa slike se može iščitati da je predznak relativnoga visinskog pomaka repera ΔH_{AB} , između epoha t_A i t_B , negativan (spuštanje repera).



Slika 5. Trajektorija vertikalnoga gibanja repera R tijekom vremena (Rožić 2017).

Visinski se pomak ΔH_{AB} , prema Rožić (2017), određuje pomoću izraza

$$\Delta H_{AB} = \Delta H_B - \Delta H_A = \frac{1}{2} \Delta t_{AB} [2v_0 + a(t_A + t_B - 3748,0)], \quad (3)$$

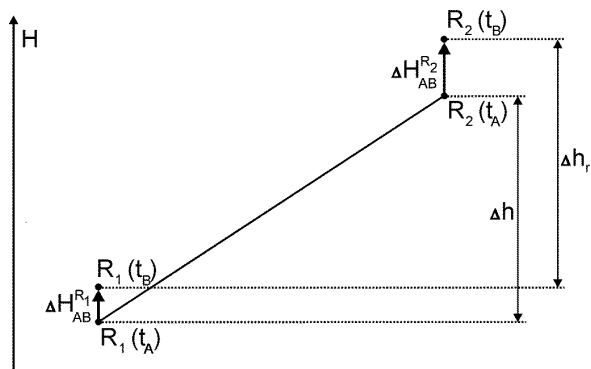
gdje je Δt_{AB} vremenski interval između vremenski starije epohe t_A i vremenski mlađe epohe t_B , a iznos od 3748,0 godine dvostruki je iznos inicijalne epohe modela t_0 . Izraz (3) je krajnje jednostavno generiran, tj. slijedi iz razlike izraza (1) primijenjenih za epohu t_A i epohu t_B . Može se zamijetiti da za određivanje relativnoga visinskog pomaka praktično nije potreban kinematički parametar ΔH_0 .

S obzirom na to da visinsku razliku Δh nekog nivelmanskog vlaka uvijek definiraju dva repa, početni reper R_1 i završni reper R_2 , razvidna je mogućnost računanja redukcije visinske razlike $r_{\Delta h}$, npr. iz epohe njezine izvorne izmjere t_A u neku posve drugu epohu t_B , slika 6. U tu svrhu izraz (3), odnosno kinematički model, neovisno je primjenjiv na oba repa, tj. za početni reper nivelmanskog vlaka R_1 određen je relativni visinski pomak $\Delta H_{AB}^{R_1}$, a za završni reper R_2 relativni visinski pomak $\Delta H_{AB}^{R_2}$. Tada je redukcija neposredno izmjerene visinske razlike Δh određena izrazom

$$r_{\Delta h} = \Delta H_{AB}^{R_1} - \Delta H_{AB}^{R_2}, \quad (4)$$

a reducirana visinska razlika Δh_r izrazom

$$\Delta h_r = \Delta h + r_{\Delta h}. \quad (5)$$

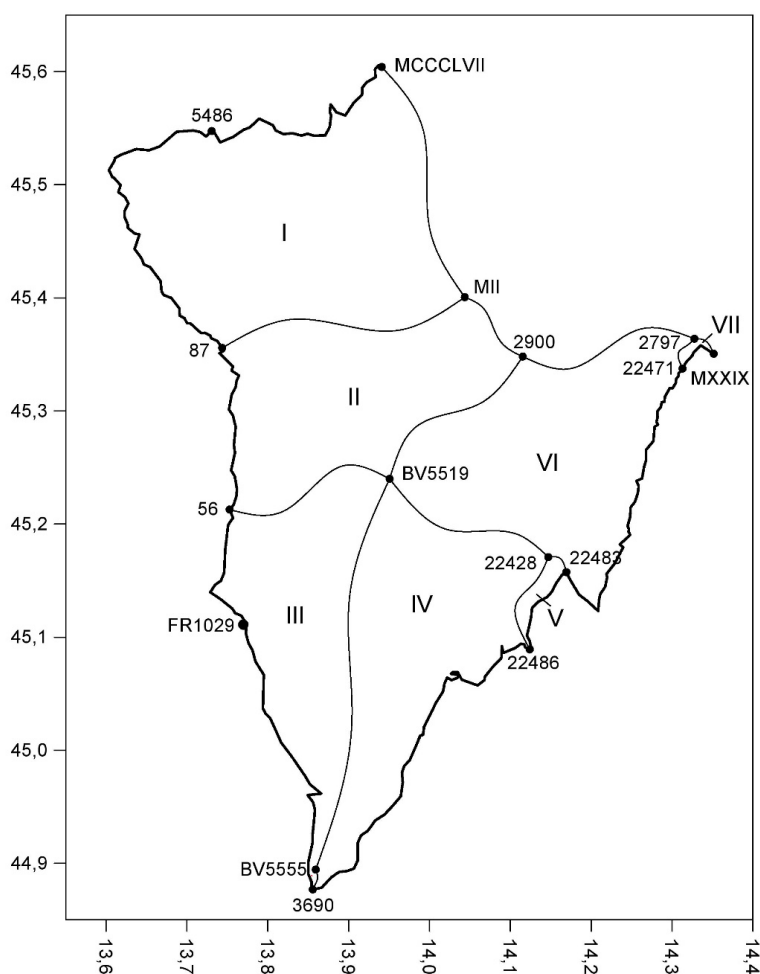


Slika 6. Redukcija visinske razlike Δh između repa R_1 i R_2 (Rožić 2017).

4. Podatci za analizu kvalitete kinematičkog modela

Na teritoriju Hrvatske i neznatnom dijelu Slovenije, odnosno teritoriju poluotoka Istre, a u cijelosti unutar I. nivelmanskog poligona mreže IINVT-a, sadržana su ukupno 22 nivelmanska vlaka, tj. odsječka nivelmanskih vlakova, koji su umreženi pomoću 16 repa. Pritom 9 odsječaka nivelmanskih vlakova pripada nivelmanskim vlakovima mreže IINVT-a (I. red), tj. nivelmanskim vlakovima br. 5 (Brajkovići – Koper), br. 6 (Koper – Bled) i br. 12 (Bakar – Brajkovići); 6 odsječaka

pripada nivelmanskim vlakovima I. nivelmana visoke točnosti, tj. vlakovima br. 122 i 275 koji su u sklopu realizacije HVR571 (Hrvatski visinski referentni sustav – epoha 1971,5) deklasificirani u red preciznog nivelmana (II. red), te 7 vlakova i odsječaka vlakova pripada preciznom nivelmanu, tj. vlakovima br. 502, 544, 545 i 547 (II. red). Vlakovi II. reda, oslonjeni na vlakove I. reda, čine nivelmansku mrežu suvisle i čvrste geometrijske konfiguracije, koja sadrži 7 zatvorenih i međusobno čvrsto povezanih nivelmanskih figura. Figure I., II., III., IV. i VI. relativno su uravnotežene veličine, dok su vrlo male figure V. i VII. posljedica specifičnih okolnosti realizacija veza vlakova II. reda na vlakove I. reda. Shema konfiguracije nivelmanske mreže, koja je prilagođena reljefnim svojstvima Istre te mreži prometnica koje su osigurale tvrdnu podlogu niveliranja, predložena je na slici 7, s navedenim oznakama repera i nivelmanskih figura. Elipsoidne koordinate repera, na Besselovu elipsoidu, sadržane su u tablici 1.



Slika 7. Nivelmanska mreža preciznog nivelmana (II. red) na teritoriju Istre.

Tablica 1. *Koordinate repera I. i II. reda na teritoriju Istre.*

I. red (IINVT)							II. red						
Reper	λ			φ			Reper	λ			φ		
5486	13°	43′	50″	45°	32′	51″	2900	14°	06′	55″	45°	20′	53″
87	13°	44′	37″	45°	21′	21″	BV5519	13°	57′	02″	45°	14′	24″
56	13°	45′	10″	45°	12′	46″	MII	14°	02′	37″	45°	24′	02″
MCCCLVII	13°	56′	27″	45°	36′	15″	22428	14°	08′	49″	45°	10′	15″
3690	13°	51′	20″	44°	52′	37″	2797	14°	19′	39″	45°	21′	50″
MXXIX	14°	21′	05″	45°	21′	02″	BV5555	13°	51′	07″	44°	52′	48″
22471/547	14°	18′	46″	45°	20′	15″							
22483/547	14°	10′	09″	45°	09′	27″							
22486/547	14°	07′	26″	45°	05′	21″							
FR1029	13°	46′	11″	45°	06′	40″							

U tablici 2 sadržani su podatci nivelmanskih vlakova mreže I. reda. Navedene su visinske razlike nivelmanskih odsječaka Δh , koje nisu dobivene izvornom izmjerom, već su dobivene računskom obradom, tj. izjednačenjem mreže IINVT-a, u sklopu realizacije HVRS71 (Klak i dr. 1992). Svim odsječcima, odnosno nivelmanskim vlakovima, pridružena je kao jedinstvena epoha srednja epoha izmjere mreže IINVT-a, koja iznosi 1971,1 godinu.

Tablica 2. *Podatci nivelmanskih vlakova I. reda.*

Br. vlak	Od repera	Do repera	L [km]	Δh [m]	Epoha [god.]
5	FR1029	56	15,03	50,8060	1971,1
5	56	87	20,68	-203,9197	1971,1
5	87	5486	39,76	-17,0301	1971,1
6	5486	MCCCLVII	29,23	490,5871	1971,1
12	MXXIX/275	22471/547	4,69	-37,4836	1971,1
12	22483/547	22486/547	10,22	131,7326	1971,1
12	22486/547	3690/122	44,87	-209,2656	1971,1
12	3690/122	FR1029	30,15	164,5766	1971,1
12	22471/547	22483/547	38,08	64,5601	1971,1

U tablici 3 navedeni su podatci neposredne izmjere nivelmanskih vlakova, odnosno odsječaka vlakova, koji su sadržani u mreži II. reda, s pridruženim epohama

izmjere. Vlakovi su mjereni približno dvadesetak godina prije izmjere mreže IINVT-a, u relativno kraćem vremenskom intervalu od 6 godina (1947,0–1953,0). Treba naglasiti da izvorna mjerenja tih vlakova u pravilu nisu dopunski korigirana za utjecaje nekih najvažnijih sustavnih pogrešaka u geometrijskom nivelmanu, osim normalno-ortometrijskim korekcijama u vlakovima I. nivelmana visoke točnosti.

Tablica 3. Podatci nivelmanskih vlakova II. reda (1947,0–1953,0).

Br. vlaka	Od repera	Do repera	L [km]	Δh [m]	Epoha [god.]
122	2900	BV5519	21,10	–96,7267	1948,0
122	BV5519	BV5555	52,30	–294,3500	1948,0
122	MCCCLVII	MII	29,95	–118,9118	1948,0
122	MII	2900	9,10	21,2702	1948,0
122	2900	2797	28,10	–203,0432	1948,0
275	MXXIX	2797	2,80	133,8289	1947,0
502	22428	BV5519	25,10	145,6171	1950,0
544	MII	87	36,32	–354,6127	1949,0
545	BV5519	56	22,35	–75,2218	1953,0
547	3690	BV5555	0,60	–3,7712	1953,0
547	2797	22471/547	4,40	–171,3090	1953,0
547	22483/547	22428	2,60	67,4372	1953,0
547	22428	22486/547	14,00	64,3280	1953,0

Podatci iz tablica 2 i 3 pokazuju da se mreža I. i II. reda, odnosno nivelmanski vlakovi prostiru duž teritorija na kojem pretežno postoji zamjetna, ali ne i izrazita visinska razvedenost, koja je posljedica reljefnih i geomorfoloških karakteristika teritorija Istre. Na sjevernom dijelu preteže brdovitost, dok je središnji dio duž kojeg se pruža pretežni broj vlakova tzv. niže flišno pobrde (Bertoša i Matijašić 2005). Dio nivelmanskih vlakova pruža se u reljefnoj i klimatskoj zoni priobalja, tj. kontaktnoj zoni kopna i mora.

Sukladno nivelmanskim podacima sadržanim u tablicama 2 i 3, obavljena je redukcija visinskih razlika Δh nivelmanskih vlakova i odsječaka vlakova mreže II. reda, iz epoha izmjere u srednju epohu izmjere mreže IINVT-a. Za redukciju su korišteni izrazi: (3), (4) i (5) te grid modeli kinematičkih parametara, slika 1, slika 2 i slika 3, uz uporabu koordinata repera navedenih u tablici 1. Izračunate redukcije $r_{\Delta h}$ i reducirane visinske razlike $\Delta h_{r,}$ za svaki pojedini nivelmanski vlak i odsječak, predočene su u tablici 4. Na taj su način redukcijom iz izvornih podataka izmjere mreže II. reda reducirani sustavni utjecaji visinskih gibanja Zemljine kore te su mreže I. i II. reda s gledišta epoha realizacija homogenizirane, odnosno svedene su na posve istu, tj. jedinstvenu epohu 1971,1 godine.

Tablica 4. *Redukcije visinskih razlika vlakova II. reda u srednju epohu izmjere IINVT-a.*

Br. vlaka	Od repera	Do repera	L [km]	Δh [m]	$r_{\Delta h}$ [mm]	Δh_r [m]
122	2900	BV5519	21,10	−96,7267	−5,1	−96,7318
122	BV5519	BV5555	52,30	−294,3500	−25,3	−294,3753
122	MCCCLVII	MII	29,95	−118,9118	−15,7	−118,9275
122	MII	2900	9,10	21,2702	−6,3	21,2639
122	2900	2797	28,10	−203,0432	−6,5	−203,0497
275	MXXIX	2797	2,80	133,8289	1,3	133,8302
502	22428	BV5519	25,10	145,6171	2,5	145,6196
544	MII	87	36,32	−354,6127	−12,7	−354,6254
545	BV5519	56	22,35	−75,2218	−9,4	−75,2312
547	3690	BV5555	0,60	−3,7712	−0,1	−3,7713
547	2797	22471/547	4,40	−171,3090	−0,4	−171,3094
547	22483/547	22428	2,60	67,4372	0,3	67,4375
547	22428	22486/547	14,00	64,3280	−2,3	64,3257

U tablici 4 može se raspoznati da su redukcije mjerenja pretežno negativnih iznosa te da poprimaju vrijednosti u intervalu od −25,3 mm do +2,5 mm. Iznosi redukcija logično su korelirani s duljinama nivelmanskih vlakova i odsječaka, odnosno u kratkim su vlakovima redukcije visinskih razlika vrlo male, praktično neznatne ili zanemarive, dok u duljim vlakovima poprimaju veće i ujedno signifikantnije centimetarske iznose. Pretežnost negativnih predznaka na određeni način razvidno potvrđuje karakter regionalnog sustavnog utjecaja visinskih gibanja Zemljine kore na teritoriju Istre (spuštanje kore – jednostrani utjecaj). Odnosi iznosa redukcija i duljina nivelmanskih vlakova na mikrolokacijama upućuju na logičnu činjenicu da na bliskim udaljenostima repera djeluju vrlo podudarne kinematičke zakonitosti kore. S povećanjem udaljenosti one logično postaju razvidno nepodudarnije. Zamjetno je da za sve nivelmanske vlakove ili odsječke vlakova dulje od približno 5 km, izuzev vlaka br. 502, redukcije visinskih razlika poprimaju iznose od −6,3 do −25,3 mm. Iznosi redukcija svakako su signifikantni i zanemarivi, posebice s gledišta unaprijed definiranog i zahtijevanog tehničkog standarda za kvalitetu izmjere nivelmanskih vlakova i mreža II. reda, odnosno preciznog nivelmana. Taj standard uvjetuje maksimalnu dopuštenu vrijednost referentne vjerojatne slučajne pogreške mjerenja u iznosu $\pm 2,0$ mm/km i vrijednost referentne vjerojatne sustavne pogreške mjerenja u iznosu $\pm 0,4$ mm/km (Klak i dr. 2006). Na konkretnom primjeru posve je razvidno da bi zanemarivanje redukcija mjerenja u mreži II. reda, odnosno zanemarivanje efekata visinske kinematike repera, moralo imati određeni utjecaj na kvalitetu uklapanja mreže II. reda na okvir mreže I. reda, a logično je pitanje na koje bi trebalo naći odgovor: Koliki je taj utjecaj?.

5. Analiza kvalitete izvornih i reduciranih mjerenja

Ocjena točnosti mjerenja sadržanih u nivelmanskoj mreži čvrste geometrijske konfiguracije, kakva je mreža II. reda predložena na slici 4, moguća je na dva različita načina, tj. uporabom dvaju međusobno različitih modela ocjene točnosti. Prvi je ocjena točnosti mjerenja „*a priori*“, u sklopu kojeg se točnost mjerenja određuje prije izjednačenja mreže, na temelju nesuglasica zatvaranja nivelmanskih figura mreže. Drugi je ocjena točnosti „*a posteriori*“, u sklopu kojeg se određuje ocjena točnosti mjerenja na temelju izjednačenja mreže kao integralne cjeline. U prvom se slučaju svaka zatvorena nivelmanska figura smatra zasebnim elementom, koja s ostalim figurama nije i ne mora biti eksplicitno povezana (iako u naravi jest), tj. figure se smatraju u potpunosti neovisnima, dok se u drugom slučaju mreža uistinu smatra cjelinom, s međusobno čvrsto i jednoznačno geometrijski povezanim figurama (Rožić 1995).

U teorijskom bi pogledu točnost mjerenja „*a priori*“ i „*a posteriori*“ trebala biti vrlo podudarna, praktično u potpunosti ista, ako su u mjerenjima sadržani isključivo slučajni utjecaji. Empirijski gledano, prethodno navedeni teorijski ideal teško je ostvariv jer u nivelmanskim mjerenjima uvijek ostaju sadržani i različiti sustavni utjecaji. Stoga podudarnost ili nepodudarnost kriterija točnosti mjerenja „*a priori*“ i „*a posteriori*“ može indicirati prisutnost te ujedno i razinu učinka sustavnih pogrešaka sadržanih u mjerenjima. Moguća je pojava i vrlo nepovoljne varijante, tj. situacije u kojoj je točnost mjerenja „*a priori*“ i „*a posteriori*“ podudarna unatoč signifikantnom djelovanju sustavnih utjecaja, kao posljedica naglašene razine njihove međusobne kompenzacije.

Pomoću izvornih i reduciranih visinskih razlika nivelmanskih vlakova i odsječaka vlakova II. reda iz tablice 4 te visinskih razlika nivelmanskih vlakova i odsječaka vlakova IINVT-a iz tablice 2 određene su nesuglasice zatvaranja nivelmanskih figura mreže sukladno konfiguraciji predloženoj na slici 4. Izračunati iznosi nesuglasica W koje se odnose na izvorna i W_r koje se odnose na reducirana mjerenja upisani su u tablicu 5.

Tablica 5. Nesuglasice zatvaranja nivelmanskih figura s izvornim i reduciranim mjerenjima.

Figura	F [km]	W [mm]	W_r [mm]
I.	135,26	32,5	4,1
II.	109,55	14,7	6,7
III.	120,43	25,6	9,8
IV.	136,87	24,1	44,4
V.	26,82	–32,6	–30,6
VI.	119,38	–11,1	–10,1
VII.	11,89	–3,5	–4,4

Nesuglasice zatvaranja nivelmanskih figura W određene s izvornim mjerenjima i W_r određene s reduciranim mjerenjima iskazuju razumne iznose i ujedno pokazuju logične odnose između broja pozitivnih i negativnih nesuglasica. Navedeno upućuje na činjenicu da u mjerenjima visinskih razlika vlakova II. reda nisu sadržane signifikantne grube pogreške mjerenja te da nesuglasice figura načelno slijede zakonitost ponašanja slučajnih varijabli. Takva je pojavnost suglasna s teorijskom interpretacijom nesuglasica nivelmanskih figura, koje bi trebale biti posljedica djelovanja isključivo slučajnih pogrešaka mjerenja, iako empirijsko iskustvo pokazuje da su u njima sadržani i sustavni efekti. Pritom su iz nesuglasica W_r eliminirani jedino sustavni utjecaji koji su isključivi rezultat djelovanja visinske kinematike repera.

Zanimljivo je naglasiti da nakon uvedenih redukcija mjerenja ni u jednoj nivelmanskoj figuri nesuglasice nisu promijenile predznak. Razvidno je da su se nesuglasice W_r pretežno, neke u većem a neke u manjem iznosu, smanjile u odnosu na nesuglasice W , s jednim iznimkama u IV. i VII. nivelmanskoj figuri. Povećanje nesuglasice u VII. figuri je vrlo umjereno, dok je u IV. figuri zamjetno. Na temelju dobivenih empirijskih rezultata moglo bi se ocijeniti da su redukcije izvornih mjerenja pridonijele eliminaciji utjecaja visinske kinematike repera te da su iznosi redukcija mjerenja i nesuglasica određenih pomoću reduciranih mjerenja srazmjerni očekivanim učincima tog vrlo specifičnog sustavnog efekta.

Pomoću nesuglasica W i W_r te opsega nivelmanskih figura F iz tablice 5 određene su referentne vjerojatne slučajne pogreške mjerenja za izvorna u_F i reducirana mjerenja u_F^r (Bratten i dr. 1952):

$$u_F = \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 W_i^2}{\sum_{i=1}^7 F_i}} = \pm 1,6 \text{ mm/km}, \quad (6)$$

$$u_F^r = \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 W_{r_i}^2}{\sum_{i=1}^7 F_i}} = \pm 1,5 \text{ mm/km},$$

gdje su opsezi nivelmanskih figura F uvedeni kao težine. Pokazatelji točnosti mjerenja i njihov međusobni odnos upućuje na činjenicu da je točnost reduciranih mjerenja, iako u relativno vrlo malom iznosu, ipak nešto povoljnija nego za izvorna mjerenja, što je nedvojbeno posljedica eliminiranja efekata visinske kinematike repera. Dobiveni rezultat indirektno upućuje na činjenicu da je kvaliteta kinematičkog modela visinskih gibanja Zemljine kore načelno primjerena potrebama reduciranja nivelmanskih mjerenja.

U svrhu određivanja pokazatelja ocjene točnosti mjerenja „*a posteriori*“ obavljena su izjednačenja mreže II. reda, slika 4, dva puta. Prvi put s izvornim, a drugi puta s reduciranim mjerenjima, tablica 4. Mreže su izjednačene primjenom regularnog izjednačenja posrednih mjerenja različitih točnosti, uz primjenu metode najmanjih kvadrata (Feil 1989, Feil 1990). Za težine mjerenja uvedene su recipročne

vrijednosti duljina nivelmanskih vlakova L u kilometrima. U funkcijski model mjerenja, kao fiksni i bespogrešni parametri, uvedene su izjednačene vrijednosti apsolutnih visina repera sadržanih u nivelmanskim vlakovima IINVT-a (I. red). To su apsolutne visine repera: *MCCCLVII*, 5486, 87, 56, *FR1029*, 3690, 22486, 22483, 22471 i *MXXIX* (Klak i dr. 1992). U sklopu izjednačenja određena je točnost izvornih i reduciranih mjerenja, izražena kriterijem referentnih vjerojatnih pogrešaka u_γ i u_γ^r :

$$u_\gamma = \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{13} p_i v_i^2}{n_f}} = \pm 3,0 \text{ mm/km},$$

$$u_\gamma^r = \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{13} p_i v_{r_i}^2}{n_f}} = \pm 2,3 \text{ mm/km},$$
(7)

gdje su: n_f broj prekobrojnih mjerenja, p_i težine mjerenja te v_i i v_{r_i} popravci izvornih, odnosno reduciranih mjerenja, određeni izjednačenjem mreže. Pokazatelj točnosti mjerenja i njihov međusobni odnos upućuje na činjenicu da je točnost reduciranih mjerenja u ovom slučaju razvidnije povoljnija nego za izvorna mjerenja. Dobiveni rezultat indirektno ukazuje na činjenicu da je kvaliteta kinematičkog modela visinskih gibanja Zemljine kore primjerena za potrebe reduciranja nivelmanskih mjerenja.

Ujedno, izraz (7) razvidno pokazuje da je u mreži II. reda postignuta primjerena razina točnosti mjerenja ($\pm 2,3$ mm/km) koja je načelno, unatoč vrlo blagom otklonu, sukladna s unaprijed deklariranim standardom točnosti mjerenja za nivelmanske vlakove II. reda u iznosu $\pm 2,0$ mm/km. S tim je standardom uostalom sukladna i točnost mjerenja „*a priori*“ ($\pm 1,5$ mm/km) predložena u izrazu (6). Određena disproporcija u odnosu točnosti mjerenja „*a priori*“ i „*a posteriori*“, izrazi (6) i (7), nije pretjerano iznenađujuća. Ona je primarno posljedica različitih modela na kojima počiva određivanje točnosti mjerenja „*a priori*“ i „*a posteriori*“, vezanih uz različito razumijevanje geometrije nivelmanske mreže, te posljedica nazočnosti i zakonitosti djelovanja sustavnih pogrešaka sadržanih u mjerenjima (Braaten i dr. 1950, Rožić 1995). Ta disproporcija na suptilan način upućuje na činjenicu da su u izvornim mjerenjima visinskih razlika mreže II. reda sadržane različite sustavne pogreške mjerenja, koje uključuju i pogreške proizašle iz visinske kinematike repera. One kumulativno, sukladno razini međusobne kompenzacije, djeluju na kriterije točnosti mjerenja. U konkretnom slučaju moglo bi se zaključiti da je utjecaj visinske kinematike repera u odnosu na sve ostale sustavne utjecaje relativno malen, na što upućuje umjereno povišenje točnosti mjerenja iskazanih vjerojatnim pogreškama u_F^r i u_γ^r , a komparativno u odnosu na vjerojatne pogreške u_F i u_γ . Također, moglo bi se zaključiti da se razgraničenjem i redukcijom utjecaja visinske kinematike repera od svih ostalih sustavnih utjecaja sadržanih u mjerenjima nije radikalnije izmijenila razina njihove međusobne kompenzacije, odnosno rezultanta njihova skupnog jednostranog sustavnog djelovanja.

6. Zaključak

Prethodno izloženi rezultati određivanja kvalitete mjerenja vezani uz I. nivelmanski poligon mreže IINVT-a logično se nadovezuju na rezultate ispitivanja i analize kvalitete kinematičkog modela visinskih gibanja Zemljine kore koji su predloženi u Rožić (2017), a odnose se na III. i V. nivelmanski poligon mreže IINVT-a. Na temelju podataka i rezultata vezanih uz teritorij Istre znatno se pouzdanije može ustvrditi da kinematički model relativnih visinskih gibanja Zemljine kore kvalitativno može poslužiti u svrhu reduciranja nivelmanskih mjerenja iz različitih epoha izmjere, realiziranih na teritoriju Hrvatske, u jednu jedinstvenu epohu. Temeljem empirijskih pokazatelja referiranih na: I., III. i V. nivelmanski poligon mreže IINVT-a, vrlo je vjerojatna ocjena da su sustavni utjecaji visinske kinematike repera, posebice oni koji su vezani uz kraće vremenske intervale, znatno blaži i umjerenije izraženi od djelovanja ostalih najznačajnijih sustavnih utjecaja u geometrijskom nivelmanu, tj. primarno: visinske refrakcije, nehomogenosti mjerila nivelmanskih letava, popuštanja nivelmanskih papuča i stativa te neparalelnosti nivo ploha gravitacijskog polja. Razvidno je da su ti sustavni utjecaji, sukladno izvorima i zakonitostima djelovanja, u velikoj mjeri korelirani s reljefnim i klimatskim svojstvima teritorija duž kojeg se pružaju nivelmanski vlakovi. I u ovom slučaju, odnosno pri primjeni indirektnih metode vrednovanja kvalitete kinematičkog modela, u punoj se mjeri iskazuje kompleksnost djelovanja sustavnih utjecaja sadržanih u podatcima nivelmanske izmjere te kompleksnost njihova modeliranja i interpretacije.

U širem smislu, može se ustvrditi da kinematički model relativnih visinskih gibanja Zemljine kore na teritoriju Hrvatske, unutar vremenskog intervala 1874.–1973. godine, može korisno poslužiti za određivanje regionalnih promjena relativnih visinskih odnosa diskretnih točaka Zemljine kore i trendova gibanja kore na pouzdanoj centimetarskoj razini.

Također, na temelju dobivenih rezultata pokazuje se smislenim i održivim nastaviti uporabu indirektna metode te objediniti već obavljene analize kvalitete kinematičkog modela s rezultatima ostalih nivelmanskih figura mreže IINVT-a, sukladno dostupnosti podataka izmjere nivelmanskih vlakova i mreža II. reda te službenih podataka realizacije HVR571, odnosno uporabnih podataka mreže IINVT-a (I. red).

Literatura

- Bertoša, M., Matijašić, R. (2005): Istarska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb.
- Braaten, N. F., Dore, P., Kukkamäki, T. J., Rune, J., Vignal, J. (1950): Note sur l'évaluation de la précision d'un nivellement, *Bulletin Géodésique*, 18, 494–548.
- Feil, L. (1989): Teorija pogrešaka i račun izjednačenja – prvi dio, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Feil, L. (1990): Teorija pogrešaka i račun izjednačenja – drugi dio, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Klak, S., Feil, L., Rožić, N. (1992): Studija o sređivanju geometrijskog nivelmana na području Republike Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Klak, S., Feil, L., Rožić, N. (2006): Pravilnik o radovima geometrijskog nivelmana – prijedlog, Zbornik radova 1990.–2000. – In memoriam profesor emeritus dr. sc. Stjepan Klak, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- Rožić, N. (1995): Ispitivanje slučajnih i sistematskih pogrešaka u geometrijskom nivelmanu, doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Rožić, N. (2001): Fundamental levelling networks and height datums at the territory of the Republic of Croatia, *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, Akadémiai Kiadó, DOI: 10.1556/AGeod.36.2001.2.10, Vol. 36, No. 2, 231–243.
- Rožić, N. (2015): Kinematic models of recent motion of the Earth's crust on the territory of Croatia, Slovenia and Bosnia and Herzegovina, *Geofizika*, 32, 209–236.
- Rožić, N. (2016): Kinematic model grid files, <http://www2.geof.unizg.hr/~nrozic/RCM/>.
- Rožić, N. (2017): Quality evaluation of height movement kinematic model of the Earth's crust on the Croatian territory, *Geofizika*, 34, 67–92.
- Rožić, N., Razumović, I. (2010): Vertical crustal movements on the territory of the Croatia, Bosnia and Herzegovina and Slovenia, *Bulletin of Geodesy and Geomatics*, *Journal of Instituto geografico militare*, Vol. LXIX, No. 2–3, 195–209.
- Rožić, N., Razumović, I., Nazifovski, I. (2011): Modelling of the recent crustal movements at the territory of Croatia, Slovenia and Bosnia and Herzegovina, *Geofizika*, 28, 183–213.
- Železnjak, D. (2015): Funkcionalnost i učinkovitost modela recentnih pomaka Zemljine kore za teritorij Republike Hrvatske, diplomski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Quality Assessment of the Earth's Crust Recent Relative Height Movement Kinematic Model on the Territory of Istria Peninsula

ABSTRACT. The quality of recent relative height movement kinematic model of the Earth's crust for the territory of Croatia, Slovenia and Bosnia and Herzegovina, for the period from 1874 to 1973, is assessed and analysed on the territory of Istria peninsula. An indirect method of quality assessment is used. This method is based on a comparison of accuracy criteria of original levelling measurements (precise levelling and measurements of First High Accuracy Levelling Network) and these measurements corrected or reduced for the systematic effect of Earth's crust height motion. On the part of 1st levelling polygon of Second High Accuracy Levelling Network (IINVT) that covers the area of Istria peninsula levelling lines height differences were reduced from their original survey epochs to the mean survey epoch of IINVT using the kinematic model. „A priori“ and „a posteriori“ measurement accuracy criteria are calculated, compared and analysed. The results show that reductions leads to a moderate increase in accuracy compared to original measurements accuracy. It confers that the height movement kinematic model contributed to removing of the systematic effect of Earth's crust height motion which is included in the levelling measurements.

Keywords: kinematic model, crust height movement, systematic errors, levelling networks, height displacements, Istria.

Primljeno / Received: 2018-04-03

Prihvaćeno / Accepted: 2018-05-14